

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра радиофизики

А.В. КАРПОВ, С.А. КАЛАБАНОВ, Р.И. ШАГИЕВ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И СВЧ-УСТРОЙСТВ**

Учебно-методическое пособие

Казань – 2014

УДК 004.94
ББК 30в6

*Принято на заседании кафедры радиофизики
Протокол № 8 от 25 марта 2015 года*

Рецензент:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры Информатики и информационно-управляющих систем КГЭУ
Р.А. Ишмуратов

КАРПОВ А.В., КАЛАБАНОВ С.А., ШАГИЕВ Р.И.

Современные программные средства проектирования и моделирования печатных плат радиотехнических систем и СВЧ-устройств /
А.В. Карпов, С.А. Калабанов, Р.И. Шагиев. – Казань: Казан. ун-т, 2014.
– 30 с.

Пособие посвящено наиболее бурно развивающейся области компьютерного моделирования – структурно-функциональному моделированию и проектированию. Акцент сделан на приложения, связанные с радиоэлектроникой. В настоящем пособии рассмотрены программные продукты, использующиеся во время реализации следующих основных этапов проектирования радиоэлектронного устройства: проектирование и моделирование печатных плат радио-технических систем и СВЧ-устройств, анализ электромагнитной совместимости, тепловой анализ работы электронных устройств.

Изложено современное состояние предметной области, назначение и принципы структурно-функционального моделирования, представлены соответствующие Интернет-ресурсы. Принципиально важным является тот факт, что данное пособие представлено именно в электронном виде, а не бумажном виде. По соответствующей ссылке студент может сразу выйти на Интернет-ресурс (сайт) и оперативно более детально изучить предметную область приложения.

Обзор программных продуктов сделан по информации с сайтов основных мировых производителей-разработчиков прикладных программных пакетов, таких как Agilent Technologies, Mentor Graphics, Cadence Design Systems, Altium Limited, Sigrity Inc, Quantic EMC Inc, AWR Corporation и др.

Учебно-методическое пособие предназначено для обучающихся в магистратуре по специальности «011800.68 радиофизика» профилю подготовки «Информационные процессы и системы» в рамках изучения дисциплины «Моделирование радиофизических процессов и систем» в целях подготовки к выполнению курсовых работ, дипломных проектов и магистерских диссертаций.

© Карпов А.В., Калабанов С.А., Шагиев Р.И., 2013
© Казанский университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Программные пакеты проектирования и моделирования печатных плат.....	6
Анализ электромагнитной совместимости	14
Программные пакеты проектирования СВЧ-устройств.....	18
Программные пакеты анализа теплового режима работы электронных устройств	25
Контрольные вопросы.....	28
Список использованных ресурсов	29

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и моделирование печатных плат, анализ электромагнитной и тепловой совместимости задействуют методы структурно-функционального моделирования, рассмотренные в [1]. Вкратце повторим применение структурно-функционального моделирования в радиотехнике.

Типовой цикл проектирования радиоэлектронной аппаратуры можно разбить на несколько этапов:

- разработка структурной схемы;
- разработка принципиальной схемы, включая моделирование ее работы;
- предварительное определение конструктивных требований;
- разработка (трассировка) печатной платы (пластины из диэлектрика, на поверхности и/или в объёме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы);
- разработка корпуса и конструкции прибора в целом;
- оценка электромагнитной совместимости;
- оценка тепловых режимов;
- оценка надежности.

В современных условиях почти на всех перечисленных этапах должны использоваться специализированные системы автоматизированного проектирования электронных устройств (САПР). Поэтому основные направления проектирования можно разделить на следующие задачи:

- моделирование на уровне структурных схем;
- моделирование смешанных аналого-цифровых устройств;
- моделирование и синтез логики для ПЛИС;

- схемотехническое и электромагнитное моделирование СВЧ-устройств;

- проектирование печатных плат;
- анализ электромагнитной совместимости;
- тепловое моделирование.

Общие преимущества использования систем моделирования при проектировании радиоэлектронных устройств можно сформулировать следующим образом:

- нет необходимости в экспериментальных исследованиях, для проведения которых требуется приобретение дорогостоящих измерительных приборов, радиодеталей, трудоемкая сборка и длительная настройка макетов;

- всестороннее исследование разрабатываемых устройств в различных режимах работы (например, в предельно допустимых режимах), что не всегда возможно при натурных испытаниях;

- оценка влияния статистического разброса параметров отдельных компонентов на работы системы в целом;

- исследование влияния дестабилизирующих внешних факторов.

Перейдем к рассмотрению основных прикладных программных пакетов (САПР) для проектирования и моделирования работы печатных плат радиоэлектронных устройств, включая СВЧ-устройства.

Программные пакеты проектирования и моделирования печатных плат

После разработки принципиальной схемы устройства приступают к разработке печатной платы, а также к ее моделированию. В простейшем случае выполняется анализ на целостность сигнала (определение полосы пропускания дорожек печатной платы, анализ отражений, перекрестных помех, джиттера и т.д.). Более сложные системы требуют также осуществления моделирования на электромагнитную совместимость (ЭМС).

Моделирование сложных печатных плат еще на этапе проектирования позволяет обнаружить и устранить все слабые места в дизайне платы, тем самым существенно сэкономяв время и средства.

Основные программы для проектирования и моделирования печатных плат:

- Mentor Expedition PCB;
- Mentor PADS;
- Cadence PCB Design Studio и Allegro;
- Cadence OrCAD;
- Altium Designer (Protel DXP).

1. Mentor Expedition PCB

Производитель: Mentor Graphics

Сайт продукта: <http://www.mentor.com/pcb/expedition/layout/>

Пакет Expedition PCB представляет сейчас наиболее мощное и дорогое решение в области проектирования плат. Основу системы составляет среда AutoActive, позволяющая реализовать такие функции, как предтопологический анализ целостности сигналов, интерактивная и автоматическая трассировка с учетом требований высокочастотных плат и специальных технологических ограничений,

накладываемых использованием современной элементной базы (BGA) [2]. Единая среда позволяет с помощью модуля ICX моделировать наводки в проводниках непосредственно при прокладке трассы или шины и контролировать превышение ими заданного уровня. Одна из ключевых особенностей пакета Expedition – возможность разработчиков и групп разработчиков работать параллельно на любой стадии процесса проектирования печатной платы.

На рисунке 1 показан пример трассировки сложной многослойной печатной платы в пакете Expedition PCB. Моделирование временных характеристик и анализ целостности сигнала приведены на рисунке 2.

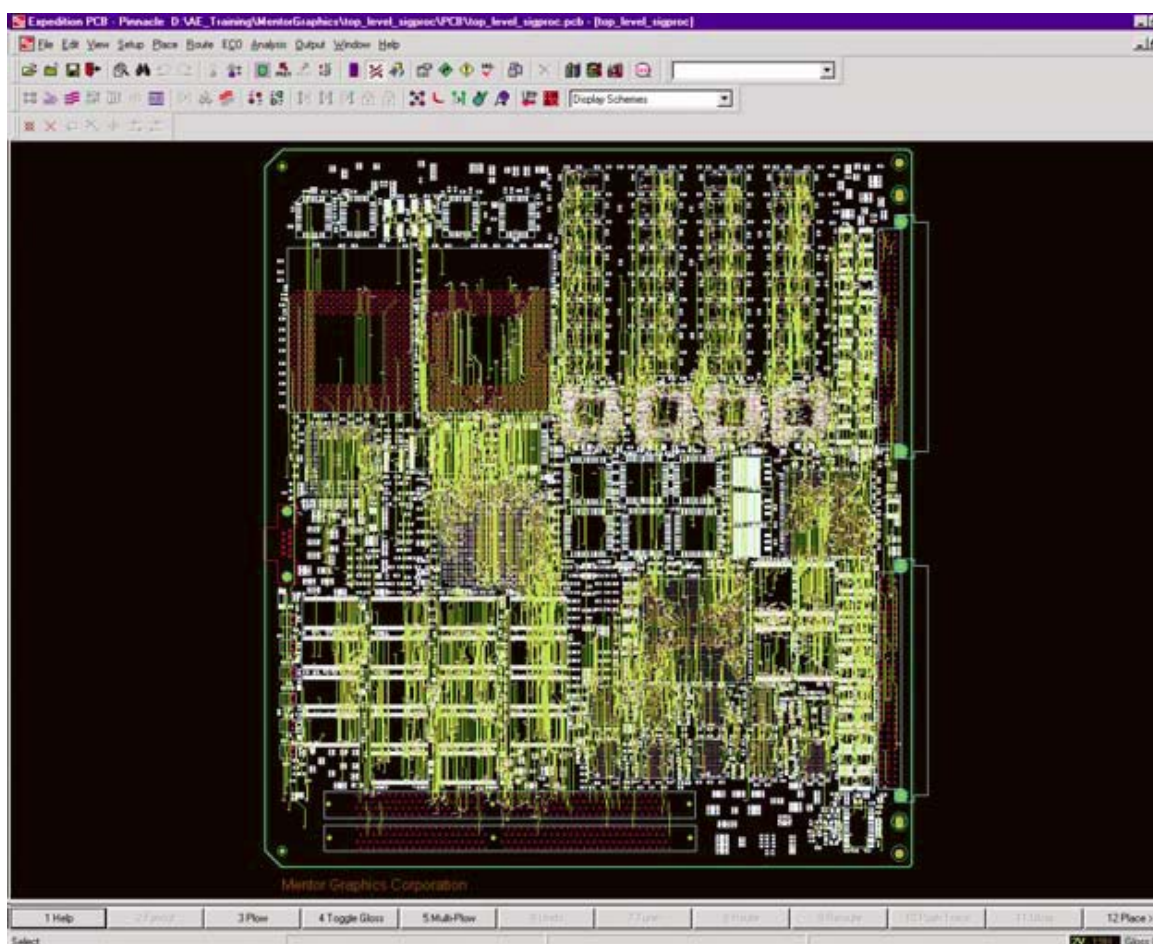


Рис. 1. Пример трассировки платы в пакете Expedition PCB

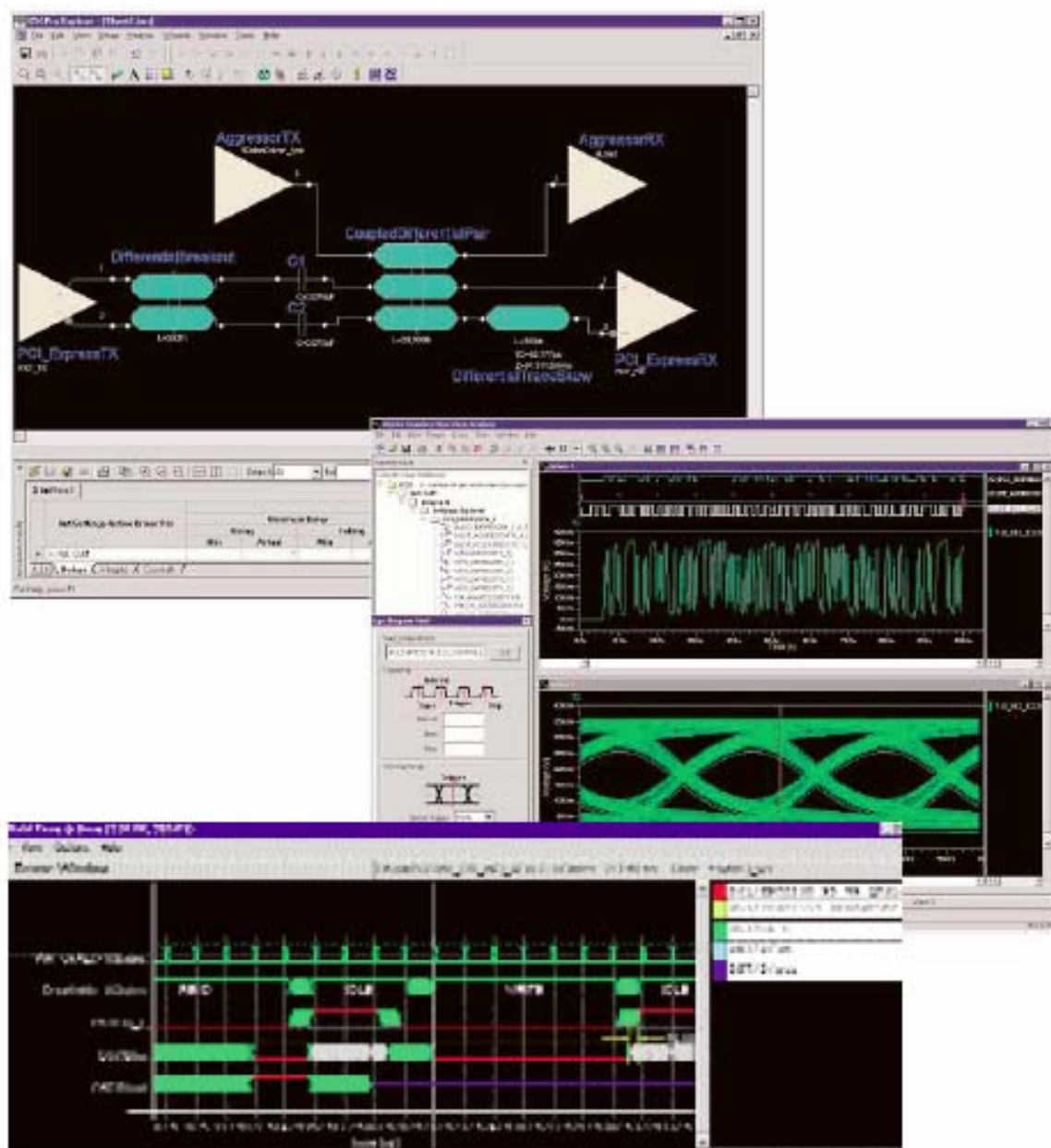


Рис. 2. Моделирование временных характеристик и целостности сигнала в пакете Expedition PCB

2. Mentor PADS

Производитель: Mentor Graphics

Сайт продукта: <http://www.mentor.com/pcb/pads/>

Другой продукт компании Mentor, система PADS, предлагает более дешевое и более простое решение. Пакет имеет модули предтопологического (HyperLinks LineSim) и посттопологического (HyperLinks BoardSim) анализа, тесно взаимодействующие с системой контроля ограничений. Сейчас эти модули значительно

улучшены за счет внедрения в них оригинальных алгоритмов моделирования, ранее применявшихся в продукте ХТК компании Innoveda. Основное отличие данного продукта от пакета Expedition PCB – нацеленность на индивидуальных разработчиков (отсутствие корпоративных функций) [3].

На рисунках 3, 4 показаны примеры трассировки и анализа временных характеристик печатных плат.

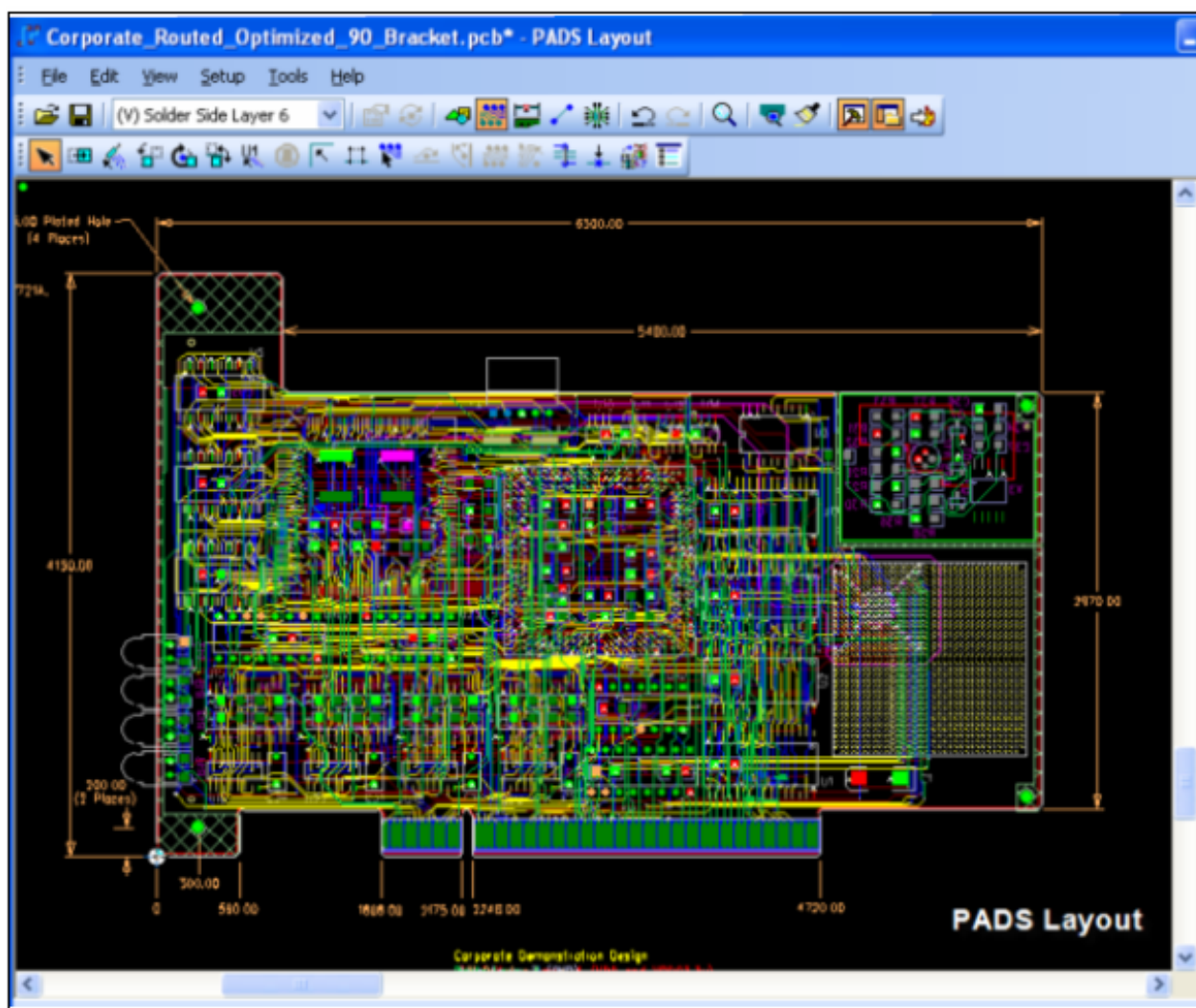


Рис. 3. Пример трассировки платы в пакете PADS

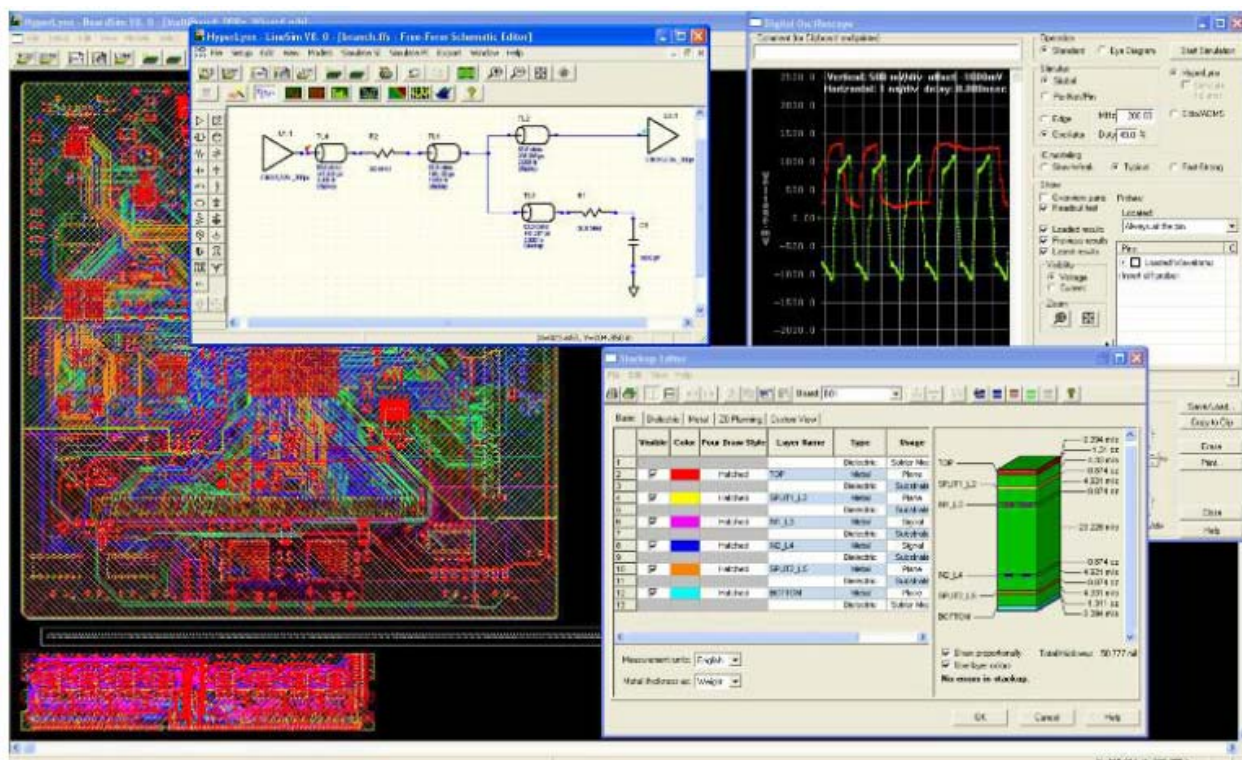


Рис. 4. Проверка целостности сигнала в пакете PADS (время нарастания/спада сигнала, перекрестные помехи, звон и т.п.)

3. Cadence Allegro PCB Designer (PCB Design Studio)

Производитель: Cadence Design Systems

Сайт продукта: http://www.cadence.com/products/pcb/pcb_design/

Далее по мощности предлагаемых решений идут решения компании Cadence. Для автоматизированного проектирования печатных плат предлагается пакет PCB Design Studio. В качестве редактора печатных плат здесь используется программа Allegro, позволяющая разрабатывать многослойные и высокоскоростные платы с высокой плотностью размещения компонентов (см. рисунок 5). В качестве штатного модуля авторазмещения и автотрассировки в данном пакете применяется программа SPECCTRA, управляемая обширным набором правил проектирования и технологических ограничений. Этот модуль является одним из лучших в своем классе [4]. Анализ электромагнитной совместимости топологии платы выполняется с помощью специального модуля SPECCTRAQuest SI

Expert, для предварительного анализа проекта и подготовки наборов правил проектирования используется модуль SigXplorer.

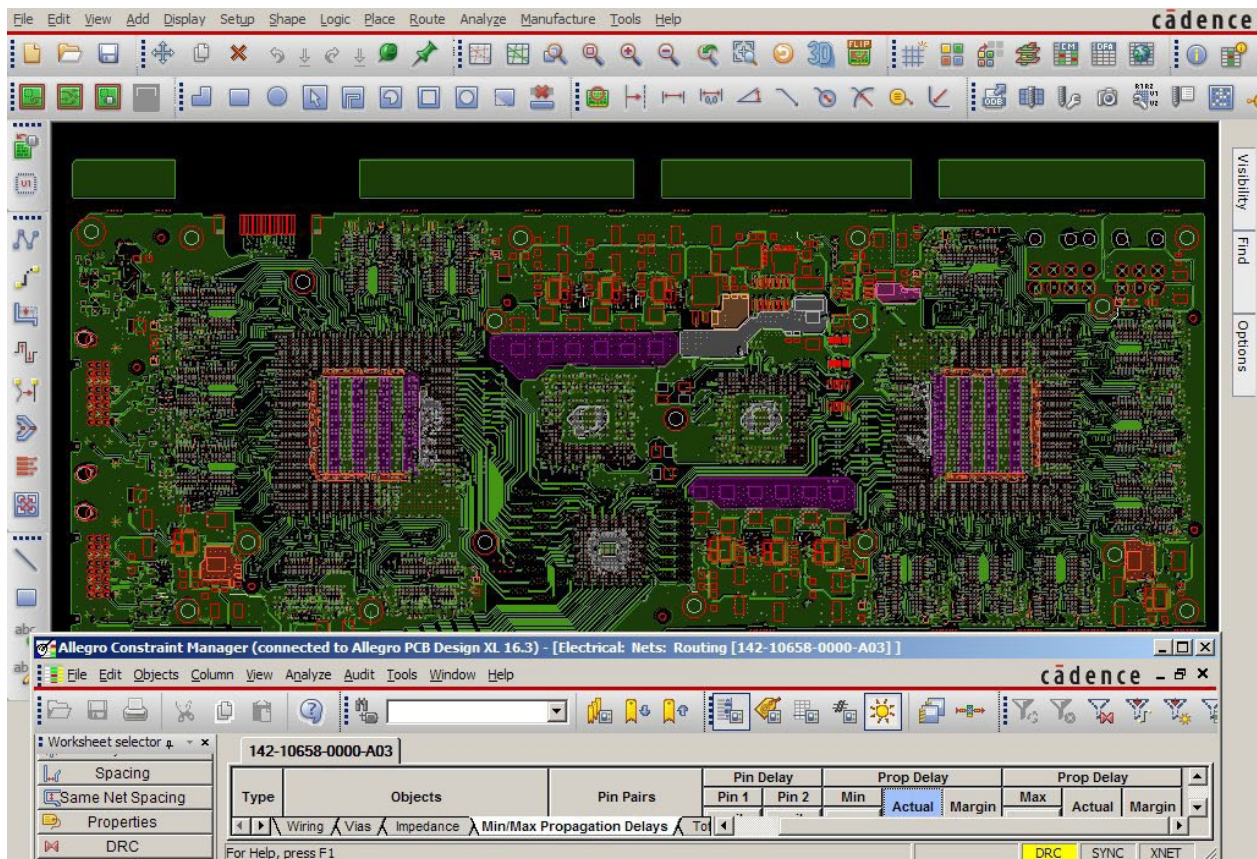


Рис. 5. Пример трассировки платы в пакете Allegro PCB Designer

4. Cadence OrCAD

Производитель: Cadence Design Systems

Сайт продукта: <http://www.cadence.com/products/orcad/>

Другой продукт компании Cadence, пакет OrCAD, рекомендуется как более легкое и дешевое решение для проектирования печатных плат. Данный пакет рассматривается фирмой Cadence как приоритетная система ввода проектов, моделирования и оптимизации схем по различным критериям [5]. Редактор печатных плат OrCAD Layout имеет три различные конфигурации с разными функциональными возможностями. В проекте платы здесь может присутствовать до 30 слоев, 16 из

которых могут быть сигнальными. Имеются встроенные средства авторазмещения и автотрассировки, а также интерфейс с программой SPECSTRA. Для работы с силовыми цепями используют объединение схемотехнического моделирования в программе OrCAD с функциональным моделированием в программе MATLAB/Simulink.

Пример трассировки печатной платы в пакете OrCAD приведен на рисунке 6.

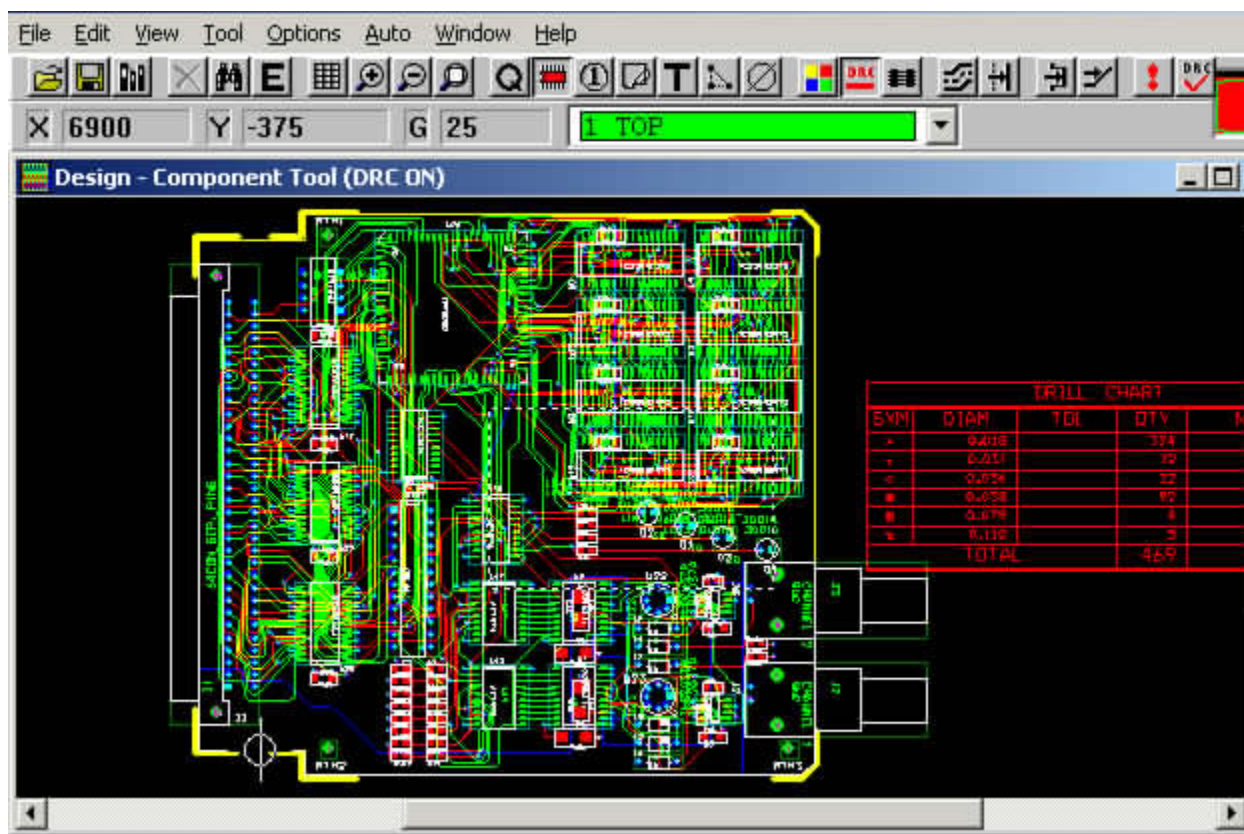


Рис. 6. Пример трассировки платы в пакете OrCAD

5. Altium Designer (Protel DXP)

Производитель: Altium Limited

Сайт продукта: <http://www.altium.com/>

Третьим основным производителем САПР печатных плат можно назвать компанию Altium Ltd (бывшая Protel International), которая выпустила пакет Altium Designer (прежнее название продукта Protel DXP). Это комплексная система сквозного

проектирования высокоскоростных электронных устройств на базе печатных плат, которая позволяет разработчику создавать проекты, начиная с принципиальной схемы и программ для ПЛИС на языке описания аппаратуры VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language), проводить моделирование полученных схем и VHDL-кодов, подготовить файлы для производства [6]. Встроенный помощник импорта проектов позволяет импортировать схемы, платы, библиотеки из систем PCAD, OrCAD, PADs, DxDesigner, Allegro PCB, преобразовывая их в проекты Altium Designer. Поддерживается передача данных в пакеты проектирования печатных плат P-CAD, OrCAD, CADStar, PADS, Protel, SCICARDS и TangoPro.

На рисунке 7 показано рабочее окно пакета Altium Designer с одновременным редактированием принципиальной схемы и трассировкой печатной платы радиотехнического устройства.

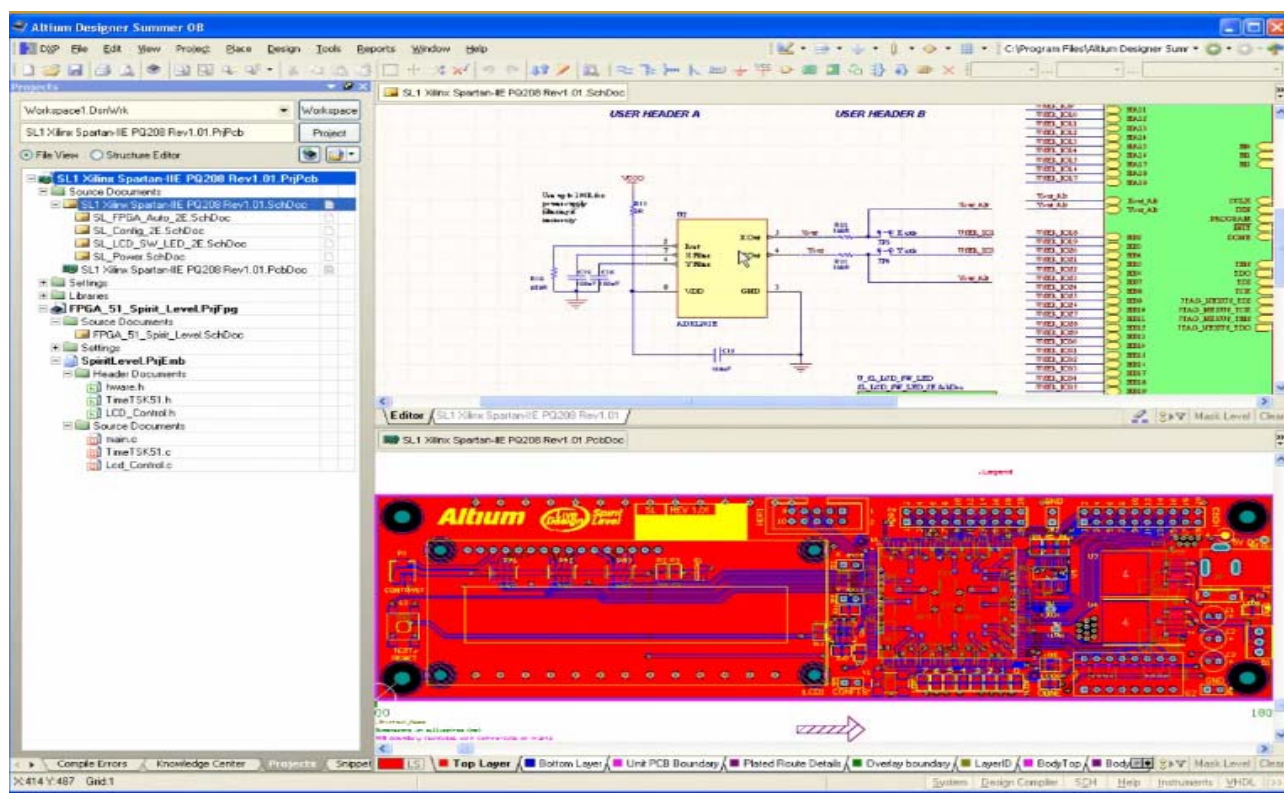


Рис. 7. Рабочее окно пакета Altium Designer

Анализ электромагнитной совместимости

Во все представленные в предыдущем разделе программные пакеты уже встроены минимальные средства анализа электромагнитной совместимости (ЭМС). В этом разделе будут рассмотрены отдельные пакеты, специализирующиеся на моделировании ЭМС и предлагающие более мощный функционал в этой области.

1. Genesys

Производитель: Agilent Technologies

Сайт продукта: <http://www.agilent.com/find/eesof-genesys>

Genesys RF and Microwave Design Software является мощным инструментом для моделирования ВЧ, СВЧ схем. Среда Genesys Core представляет собой интегрированный пакет средств, необходимых для проектирования линейных СВЧ-устройств с обеспечением высокого полезного выхода. В состав этого пакета входят полнофункциональная среда проектирования, средства линейного моделирования S-параметров и библиотеки комплектующих, средства пост-обработки данных и проектирования топологии с учетом высокочастотных эффектов, а также программы-трансляторы для импорта и экспорта.

Основные преимущества Genesys [7]:

- широчайший в отрасли охват радиочастотных и микроволновых фильтров;
- возможность системного анализа, а также планирования частот СВЧ системы;
- линейные и нелинейные модели радиочастотных схем с оптимизацией и статистическим анализом для высокопроизводительных систем;

- 3D-симулятор электромагнитной совместимости для анализа печатных плат и расположения антенн.

На рисунке 8 приведен пример трехмерного моделирования в данном программном продукте.

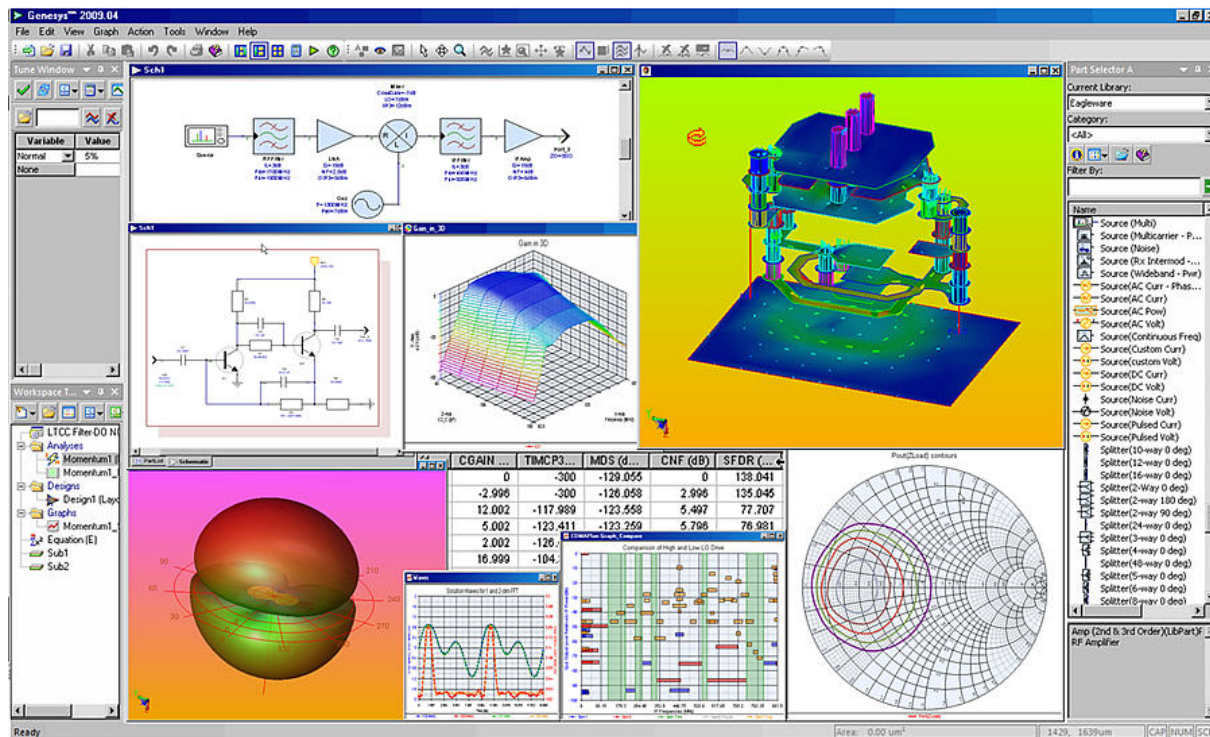


Рис. 8. Пример трехмерного моделирования в пакете Genesys

2. SPEED2000

Производитель: *Sigrity, Inc.*

Сайт продукта: <http://www.sigrity.com/products/speed2000/spd2k.htm>

Пионером в области анализа ЭМС является компания Sigrity, которая разработала пакет SPEED2000. Эта программа использует не упрощенные модели, а численные методы решения электродинамических задач, благодаря чему стало возможным исследование распространения помех по внутренним слоям питания [8]. Однако, наличие столь мощной математики делает программу почти на порядок дороже продуктов ближайших конкурентов, которые предпринимают попытки реализовать аналогичные методы в своих системах, как например, компания Mentor Graphics.

На рисунках 9, 10 показано моделирование ЭМС конструкции из печатных плат и анализ помех в земляном слое в данном пакете.

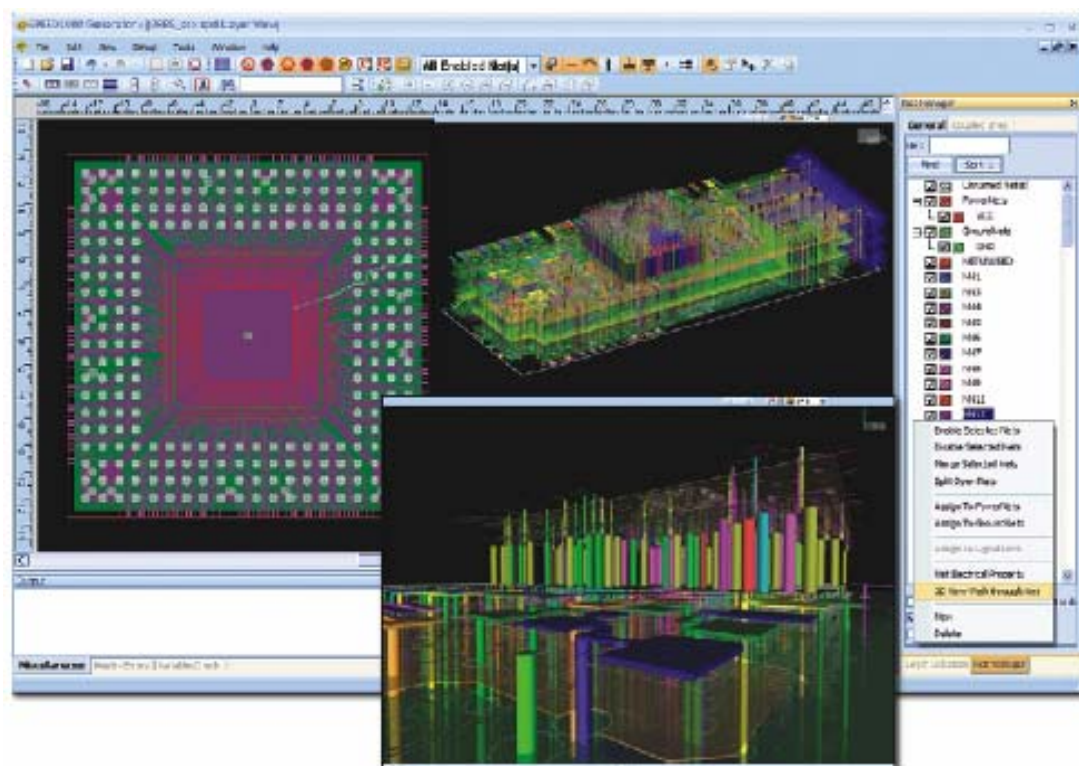


Рис. 9. Анализ отдельных печатных плат, а также конструкций из плат в пакете SPEED2000

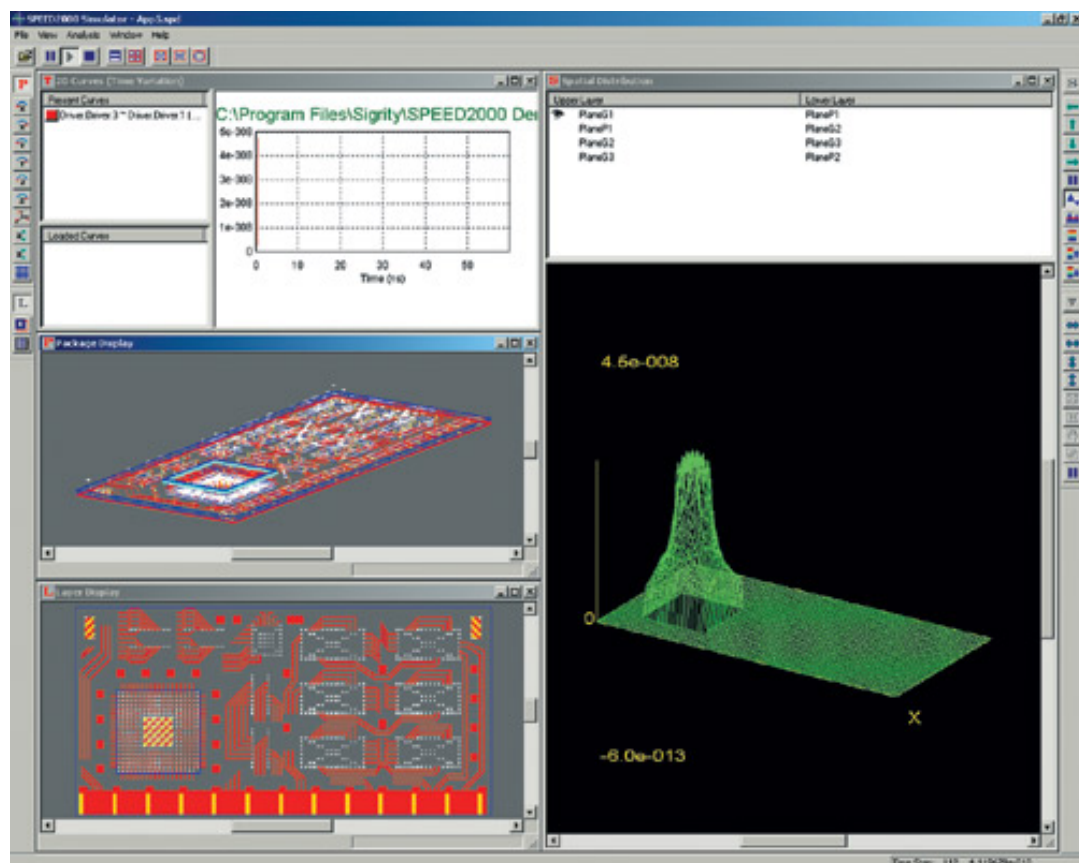


Рис. 10. Анализ помех в слое заземления в пакете SPEED2000

3. Quantic Omega PLUS

Производитель: *Quantic EMC Inc.*

Сайт продукта: http://www.quantic-emc.com/omega_plus.asp

Из программ, реализующих классический подход к анализу ЭМС, следует отметить канадскую компанию Quantic EMC предлагающую на рынок продукт Omega PLUS. Этот пакет не является системой проектирования, зато имеет средства импорта проектов из всех вышеперечисленных САПР. Помимо обычного анализа целостности сигналов и перекрестных искажений здесь могут быть получены спектры и интенсивность излучения платы в заданном диапазоне частот, уровни токов в проводниках, а также интенсивность электрического и магнитного полей над платой [9].

Образец моделирования электромагнитного излучения печатной платы в пакете Quantic Omega PLUS приведен на рисунке 11.

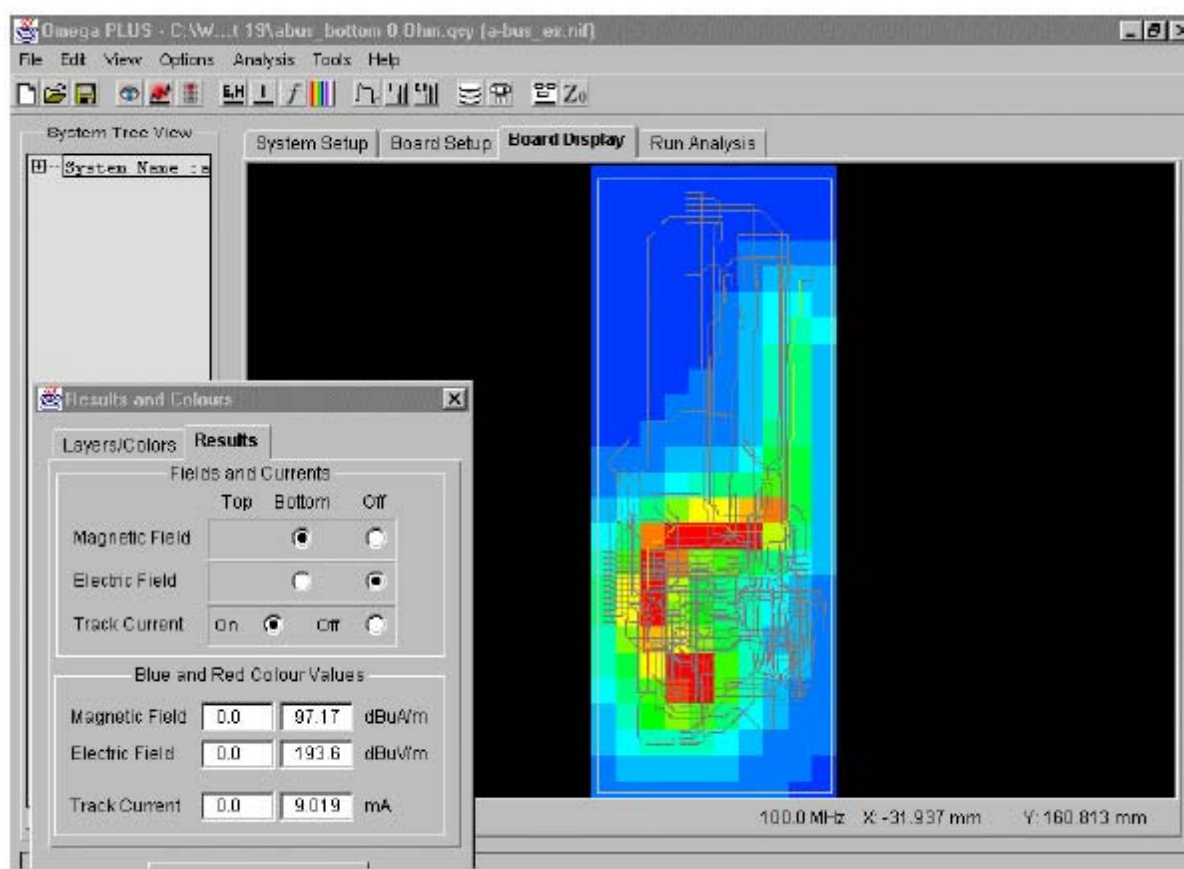


Рис. 11. Моделирование электромагнитного излучения платы в пакете Quantic Omega PLUS

Программные пакеты проектирования СВЧ-устройств

Принципиально иной уровень сложности задач решают системы проектирования СВЧ-устройств. Как правило, для получения характеристик объемных структур требуется решение уравнений Максвелла, а для моделирования линейных и нелинейных СВЧ-схем привычных моделей и методов, используемых в алгоритме SPICE, недостаточно. Поэтому предлагаются специализированные продукты:

- ПО EMPro для электромагнитного 3D моделирования и Momentum для планарного электромагнитного 3D моделирования компании Agilent Technologies;
- интегрированный пакет Microwave Office компании AWR;
- система полного электромагнитного моделирования CST Microwave Studio компании CST;
- система полного электромагнитного моделирования QuickWave-3D компании QWED;
- система полного электромагнитного моделирования EMPIRE компании IMST.

1. EMPro и Momentum

Производитель: Agilent Technologies

*Сайт продукта: <http://www.agilent.com/find/eesof-empro> ;
<http://www.agilent.com/find/eesof-momentum>*

Основное отличие данных двух программных продуктов заключается в том, что пакет Momentum позволяет осуществлять электромагнитное моделирование только планарных структур (ВЧ интегральные схемы, высокоскоростные печатные платы, ВЧ модули, антенны), а пакет EMPro – полное трехмерное моделирование объемных структур (корпуса высокоскоростных и ВЧ микросхем, соединительные провода, антенны, внутрисхемные и

внешние пассивные элементы, а также межсоединения печатных плат) [10. 11].

Основные особенности программы Momentum:

- сочетание полноволнового и квазистатического режимов ЭМ моделирования пассивных ВЧ элементов, межкомпонентных соединений и паразитных эффектов;
- эффективные многопоточные алгоритмы позволяют сократить время моделирования;
- возможность моделирования сложных ЭМ эффектов, включая скин-эффект и влияние подложки, металлических проводников конечной толщины и нескольких слоев диэлектрика.

Основные особенности программы EMPro:

- широкий набор технологий моделирования. Настройка и запуск анализа с использованием технологий 3D ЭМ моделирования как в частотной, так и во временной областях: метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD);
- удобный конструкторский интерфейс. Быстрое создание произвольных объемных структур с помощью современного простого в использовании интерфейса; расширенные возможности по созданию скриптов.

Пример трехмерного моделирования СВЧ устройства в программном пакете EMPro приведен на рисунке 12.

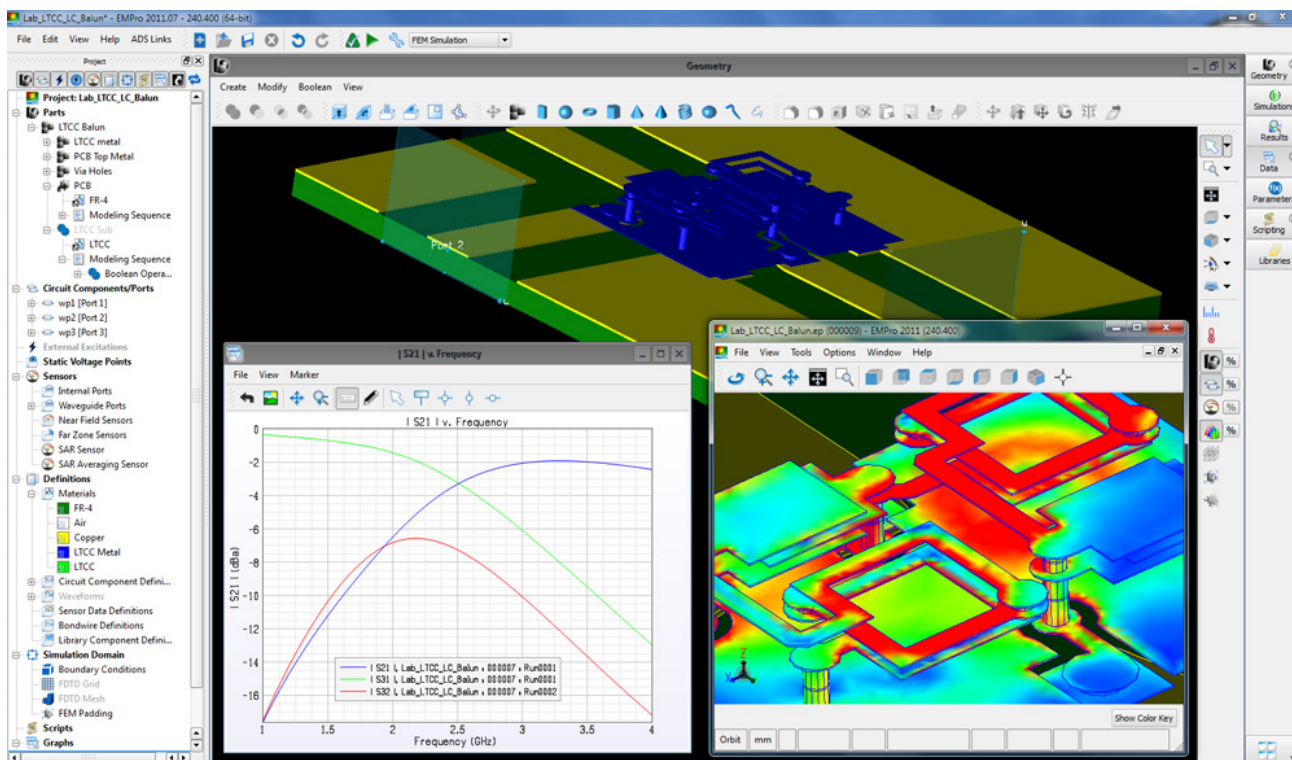


Рис. 12. Пример моделирования в пакете EMPro

2. Microwave Office

Производитель: AWR Corporation

Сайт продукта: <http://www.awrcorp.com/products/microwave-office>

Наиболее интегрированным из перечисленных является пакет Microwave Office, объединяющий модули анализа линейных и нелинейных схем, проектирования топологий, электромагнитного моделирования планарных многослойных структур, моделирования систем связи на уровне структурных схем [12]. Нелинейный анализ выполняется методом гармонического баланса и рядов Вольтерра, когда нелинейная схема преобразуется в линейную схему и несколько «нелинейных источников тока». Электромагнитное моделирование планарных СВЧ-устройств выполняется методом моментов Галеркина. Редактор топологий представляет собой не просто графическую среду прорисовки топологий устройств, но и инструмент технологической подготовки к производству.

На рисунке 13 показан пример моделирования СВЧ-усилителя в пакете Microwave Office.

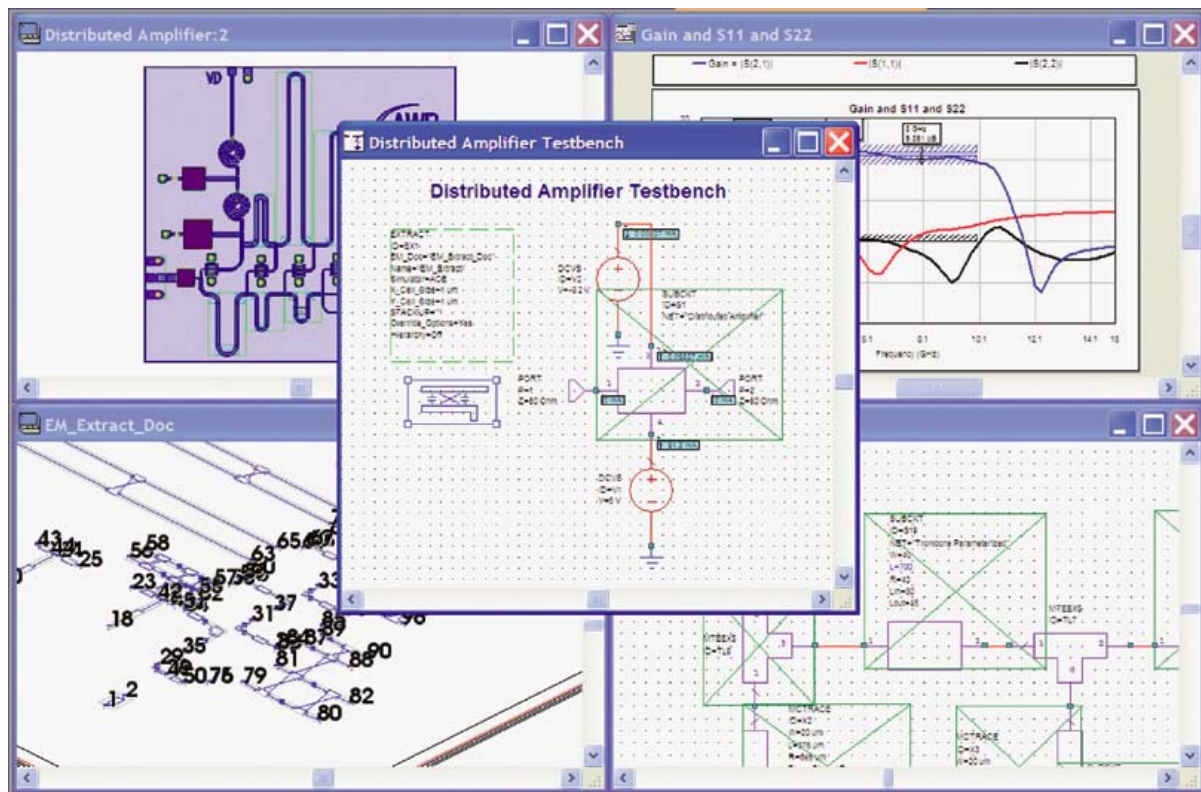


Рис. 13. Моделирование СВЧ-усилителя в пакете Microwave Office

3. CST Microwave Studio

Производитель: CST Computer Simulation Technology AG

Сайт продукта: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>

CST Microwave Studio (CST MWS) представляет собой программу, предназначенную для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения [13].

Главным преимуществом вычислительных технологий компании CST является использование аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA).

Типичными устройствами, моделируемыми с помощью пакета CST Microwave Studio, являются:

- волноводные и микрополосковые направленные ответвители мощности;
- делители и сумматоры мощности;
- волноводные, микрополосковые и диэлектрические фильтры;
- одно- и многослойные микрополосковые структуры;
- различные линии передачи;
- коаксиальные и многовыводные соединители;
- коаксиально-волноводные и коаксиально-полосковые переходы;
- оптические волноводы и коммутаторы;
- различные типы антенн - рупорные, спиральные, планарные.

На рисунке 14 приведен пример моделирования поверхностных токов рупорной антенны в пакете CST Microwave Studio.

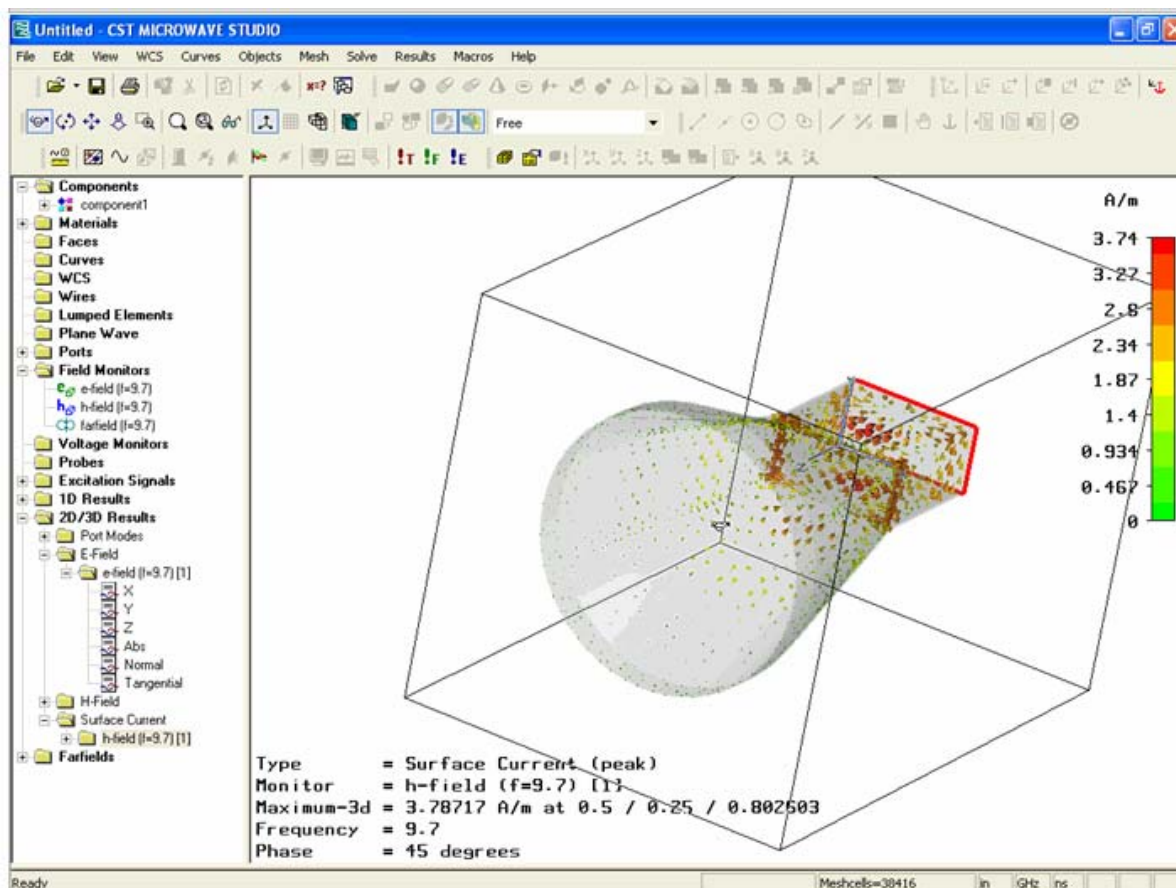


Рис. 14. Моделирование рупорной антенны в пакете CST Microwave Studio

4. QuickWave-3D

Производитель: QWED Company

Сайт продукта: http://www.qwed.com.pl/qw_3d.html

QuickWave-3D (QW-3D) является универсальным пакетом трехмерного электромагнитного моделирования на основе метода конечных разностей (FDTD), дополненного методом конформных преобразований [14].

Основное отличие данной программы от CST Microwave Studio в степени завершенности пользовательского интерфейса: второй продукт является графической средой описания задачи, а данная программа помимо прорисовки структуры требует от пользователя написания программного кода.

Пример моделирования антенны в пакете QuickWave-3D приведен на рисунке 15.

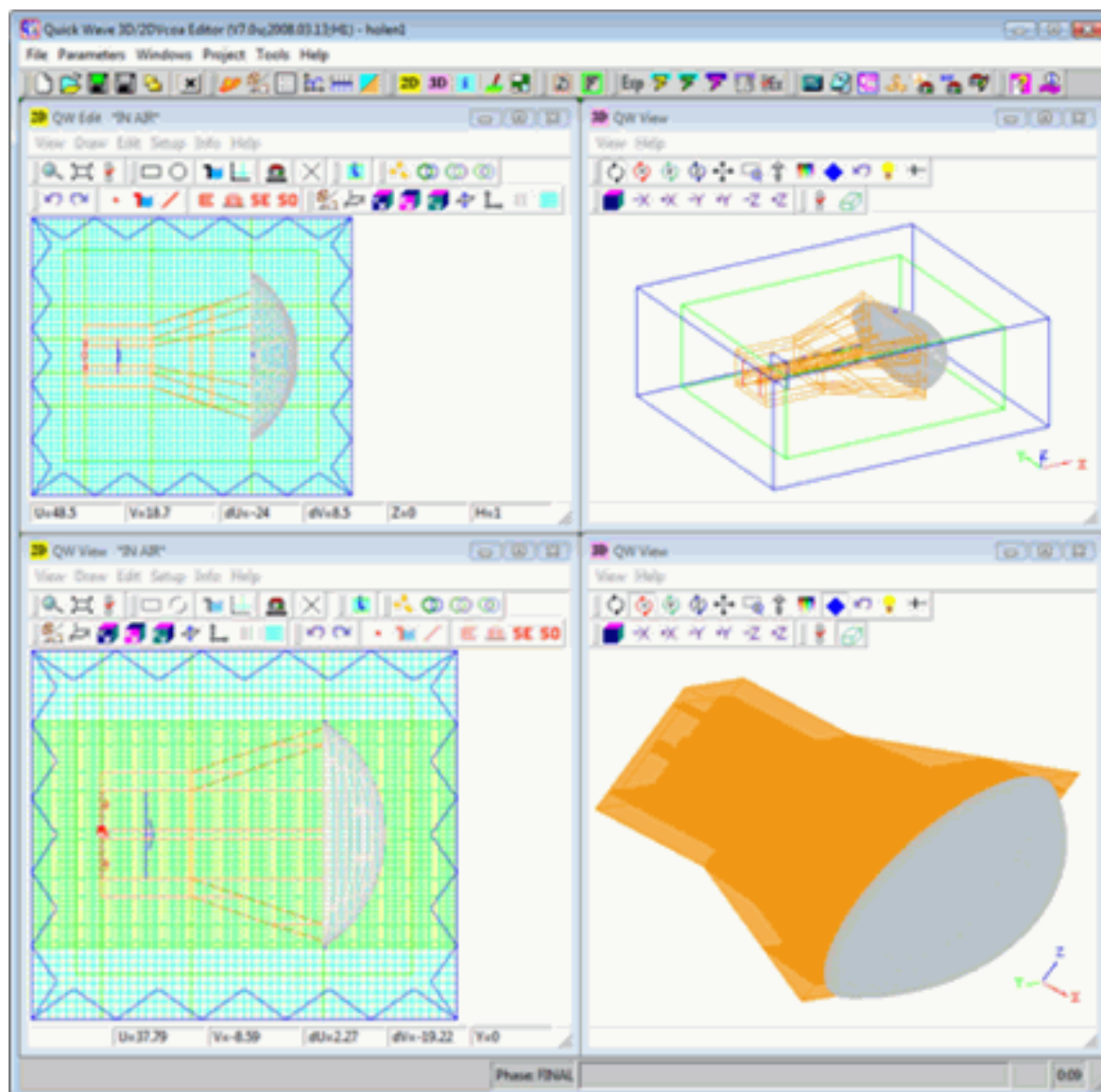


Рис. 15. Моделирование антенны в пакете QuickWave-3D

Программные пакеты анализа теплового режима работы электронных устройств

Отдельной задачей проектирования печатных плат является тепловой анализ.

В процессе разработки конструкций радиоэлектронной аппаратуры, особенно бортовой, постоянно возникает задача расчета и анализа тепловыделения, на основании которого производится выбор конструктивных решений при проектировании радиосистем. В современных условиях многие предприятия не в состоянии содержать специальные подразделения для проведения таких расчетов, и выполнять их приходится разработчику, не имеющему специальной глубокой подготовки в области теплопередачи. Существенную помощь в анализе тепловых процессов печатной платы может оказать специализированное программное обеспечение, позволяющее провести необходимые расчеты и доступное для работы пользователю, не имеющему специальной подготовки.

1. BETAsoft-Board

Производитель: Dynamic Soft Analysis

Наиболее мощным решением в этой области является программа BETAsoft-Board компании Dynamic Soft Analysis. Здесь также имеются интерфейсы импорта проектов из всех вышеперечисленных продуктов, богатые библиотеки моделей и материалов. Программа больше подойдет для разработчиков монолитных многомодульных устройств. В процессе расчета могут быть получены температуры отдельных компонентов, карты прогрева плат, градиент температур. Отметим, что программа BETASoft-Board поставляется как штатное средство теплового моделирования для продуктов Mentor Graphics.

На рисунке 16 показан результат теплового моделирования печатной платы в пакете BETAsoft-Board.

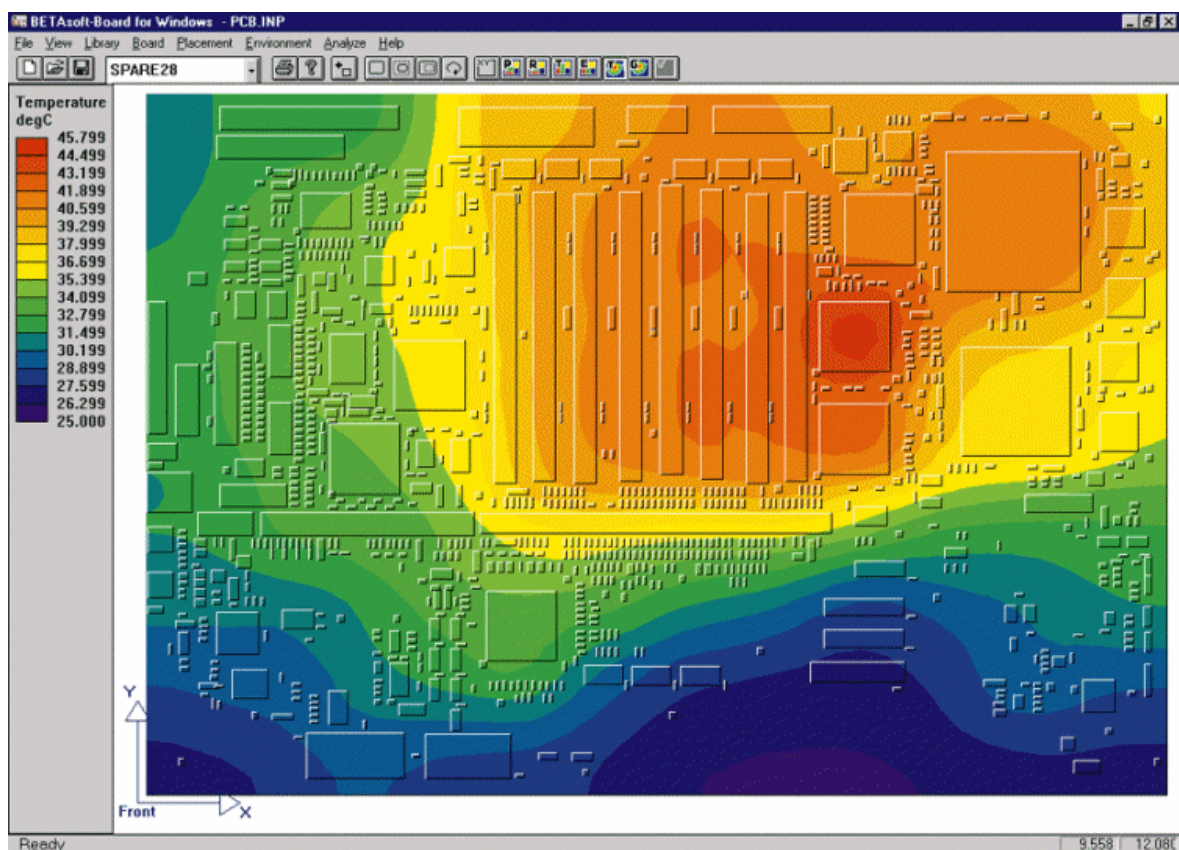


Рис. 16. Результаты теплового анализа платы в пакете BETAsoft-Board

2. Sauna

Производитель: Thermal Solutions

Сайт продукта: <http://www.thermalsoftware.com/>

Другая программа теплового анализа – Sauna компании Thermal Solutions, позволяет моделировать поведение не только плат, но и блоков и шкафов. Здесь присутствуют обширные библиотеки компонентов и материалов. Имеется специальный графический редактор, позволяющий прорисовывать конфигурацию оборудования. Система дает возможность назначать специальные рабочие циклы с учетом включения и выключения внешних источников питания [15].

Пример результатов трехмерного теплового анализа в пакете Sauna показан на рисунке 17.

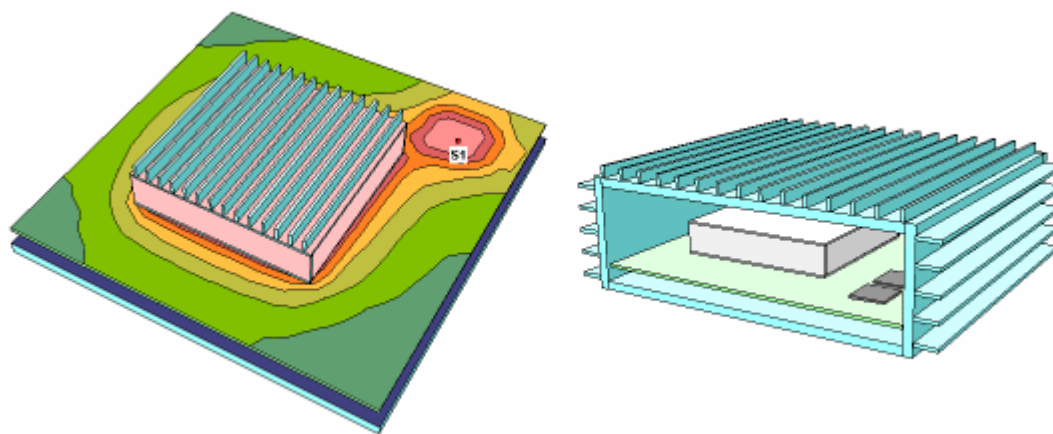


Рис. 17. Тепловое моделирование в пакете Sauna

3. HyperLynx Thermal

Производитель: *Mentor Graphics*

Сайт продукта: <http://www.mentor.com/pcb/hyperlynx/thermal/>

HyperLynx Thermal позволяет осуществлять анализ теплового режима на частично или полностью разведенных печатных платах (см. рисунок 18). Пакет моделирует теплопроводности, конвекции и излучения, а также выводит профили температуры, градиенты, карты избытка температур, решая проблемы перегрева в начале процесса проектирования [16].

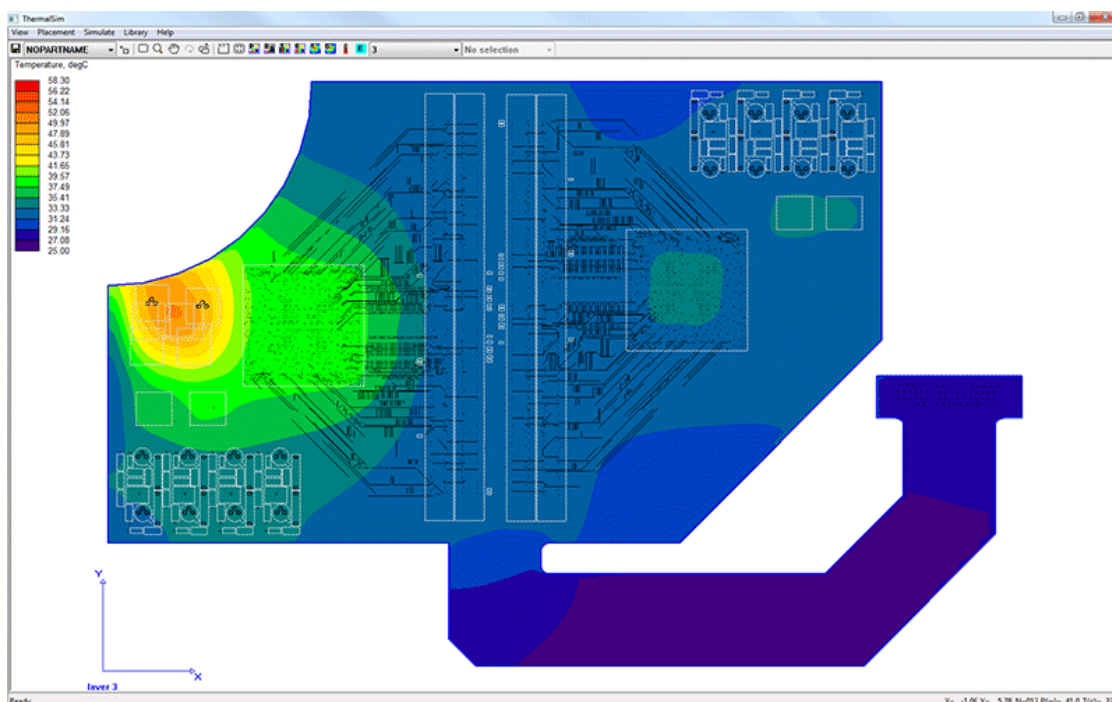


Рис. 18. Пример теплового моделирования в пакете HyperLynx Thermal

Контрольные вопросы

1. Опишите типовой цикл проектирования радиоэлектронной аппаратуры.
2. В чем заключается преимущество использования САПР при проектировании радиоэлектронных устройств?
3. Перечислите основные программные пакеты проектирования и моделирования печатных плат.
4. В чем заключается суть анализа электромагнитной совместимости схем радиоустройств?
5. Назовите основные программные пакеты для анализа ЭМС.
6. Перечислите основные САПР для проектирования и моделирования СВЧ-устройств.
7. В чем заключается необходимость проведения анализа теплового режима работы электронных устройств?
8. Перечислите основные программные пакеты для теплового анализа печатных плат.

Список использованных ресурсов

1. Карпов А.В., Калабанов С.А., Шагиев Р.И. Современные программные средства структурно-функционального и схемотехнического моделирования: учебно-методическое пособие для магистрантов и студентов старших курсов / Казань, 2013 – 36 с.
2. Программный продукт Mentor Expedition PCB (производитель Mentor Graphics) [Официальный сайт]. URL: <http://www.mentor.com/pcb/expedition/layout/> (дата обращения: 17.04.2014).
3. Программный продукт Mentor PADS (производитель Mentor Graphics) [Официальный сайт]. URL: <http://www.mentor.com/pcb/pads/> (дата обращения: 17.04.2014).
4. Программный продукт Cadence Allegro PCB Designer (производитель Cadence Design Systems) [Официальный сайт]. URL: http://www.cadence.com/products/pcb/pcb_design/ (дата обращения: 17.04.2014).
5. Программный продукт Cadence OrCAD (производитель Cadence Design Systems) [Официальный сайт]. URL: <http://www.cadence.com/products/orcad/> (дата обращения: 17.04.2014).
6. Программный продукт Altium Designer (производитель Altium Limited) [Официальный сайт]. URL: <http://www.altium.com/> (дата обращения: 17.04.2014).
7. Программный продукт Genesys (производитель Agilent Technologies) [Официальный сайт]. URL: <http://www.agilent.com/find/eesof-genesys> (дата обращения: 17.04.2014).
8. Программный продукт SPEED2000 (производитель Sigroty, Inc.) [Официальный сайт]. URL: <http://www.sigroty.com/products/speed2000/spd2k.htm> (дата обращения: 17.04.2014).

9. Программный продукт Quantic Omega PLUS (производитель Quantic EMC Inc.) [Офиц. сайт]. URL: http://www.quantec-emc.com/omega_plus.asp (дата обращения: 17.04.2014).

10. Программный продукт EMPro и (производитель Agilent Technologies) [Офиц. сайт]. URL: <http://www.agilent.com/find/eesof-empro> (дата обращения: 17.04.2014).

11. Программный продукт Momentum (производитель Agilent Technologies) [Офиц. сайт]. URL: <http://www.agilent.com/find/eesof-momentum> (дата обращения: 17.04.2014).

12. Программный продукт Microwave Office (производитель AWR Corporation) [Офиц. сайт]. URL: <http://www.awrcorp.com/products/microwave-office> (дата обращения: 17.04.2014).

13. Программный продукт CST Microwave Studio (производитель CST Computer Simulation Technology AG) [Офиц. сайт]. URL: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx> (дата обращения: 17.04.2014).

14. Программный продукт QuickWave-3D (производитель QWED Company) [Офиц. сайт]. URL: http://www.qwed.com.pl/qw_3d.html (дата обращения: 17.04.2014).

15. Программный продукт Sauna (производитель Thermal Solutions) [Офиц. сайт]. URL: <http://www.thermalsoftware.com/> (дата обращения: 17.04.2014).

16. Программный продукт HyperLynx Thermal (производитель Mentor Graphics) [Офиц. сайт]. URL: <http://www.mentor.com/pcb/hyperlynx/thermal/> (дата обращения: 17.04.2014).